

丛枝菌根对菲芘污染土壤中几种酶活性的影响

肖 敏¹, 凌婉婷^{1,2}, 高彦征¹, 程兆霞¹, 王 华², 杨振亚²

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2.江苏省环境科学研究院环境工程重点实验室, 江苏 南京 210036)

摘 要:采用温室盆栽试验方法,研究了丛枝菌根真菌(AMF)*Glomus mosseae* 和 *Glomus etunicatum* 对菲芘复合污染土壤中 3 种酶活性的影响。宿主植物为三叶草(*Trifolium repens* L.)和黑麦草(*Lolium multiflorum* Lam)。土样中菲和芘起始浓度分别为 203.4 mg·kg⁻¹ 和 107.5 mg·kg⁻¹。结果表明,植物增加了土壤多酚氧化酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性。接种 *Glomus mosseae* 和 *Glomus etunicatum* 使三叶草根际土壤多酚氧化酶活性 20~60 d 分别增加 19.6%~72.0%和 29.7%~90.6%, 过氧化氢酶活性分别增加 3.3%~12.2%和 7.8%~34.7%,酸性磷酸酶活性总体呈增加趋势;接种 *Glomus mosseae* 使黑麦草根际多酚氧化酶活性增加 18.0%~43.1%,过氧化氢酶活性总体上呈降低趋势,酸性磷酸酶活性先升高后降低。供试的两种 AMF 对三叶草根际酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性的影响 30 d 前有显著差异。AM 真菌作用的性质与宿主植物特性有关。

关键词:多环芳烃;丛枝菌根;土壤;酶;修复

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)05-0919-06

Effects of Arbuscular Mycorrhizae on Enzymes in Contaminated Soils by Phenanthrene and Pyrene

XIAO Min¹, LING Wan-ting^{1,2}, GAO Yan-zheng¹, CHENG Zhao-xia¹, WANG Hua², YANG Zhen-ya²

(1.College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Key Laboratory of Environmental Engineering, Jiangsu Provincial Academy of Environmental Sciences, Nanjing 210036, China)

Abstract: Arbuscular mycorrhizal bioremediation (AMBR) has becoming a promising new remediation technique for contaminated soils by organic pollutants including polycyclic aromatic hydrocarbons. Enzymes play an important role in AMBR process. As reported, arbuscular mycorrhizae can enhance the activity of oxidative enzymes in rhizosphere, which may lead to enhanced dissipation of PAHs in soil. Studies on effects of arbuscular mycorrhizae on enzymes in rhizosphere would be helpful to get a better understanding of AMBR for PAH contaminated soils. In this work, a greenhouse pot experiment was conducted to investigate the impacts of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), *Glomus mosseae* and *Glomus etunicatum* as representatives, on three enzymes in contaminated soils by phenanthrene and pyrene. Hosts were *Trifolium repens* L. and *Lolium multiflorum* Lam. Initial concentrations of phenanthrene and pyrene in soils were 203.4 mg·kg⁻¹ and 107.5 mg·kg⁻¹, respectively. It was observed that the activities of polyphenol oxidase, catalase and acid phosphatase enhanced in planted soil. During 20~60 d, polyphenol oxidase in rhizosphere of *Trifolium repens* L. inoculated by *Glomus mosseae* and *Glomus etunicatum* increased 19.6%~72.0% and 29.7%~90.6%, and catalase increased 3.3%~12.2% and 7.8%~34.7%, respectively. In general, phosphatase in rhizosphere of *Trifolium repens* L. enhanced with inoculation of these two AMFs. Polyphenol oxidase in rhizosphere of *Lolium multiflorum* Lam. increased 18.0%~43.1%, while catalase decreased by inoculation of *Glomus mosseae*. Acid phosphatase in rhizosphere of *Lolium multiflorum* Lam. increased at first stages and decreased thereafter with inoculation of *Glomus mosseae*. Significant difference was observed on the effects of two tested AMFs on acid phosphatase and catalase in rhizosphere of *Trifolium repens* L. in 30 d. In addition, the influence of AMF on enzymes in soils was related to their host characteristics.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); arbuscular mycorrhizae (AM); soil; enzyme; remediation

收稿日期:2008-09-05

基金项目:国家自然科学基金(20507009,20777036,40701073);江苏省青年科技创新人才基金(BK2006518,BK2007580);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0491);教育部重点实验室开放课题(EREH0703);江苏省重点实验室开放课题(KF2008001)

作者简介:肖 敏(1984—),女,陕西汉中,硕士研究生,研究方向为污染土壤生物修复。E-mail:xiao_min1984@163.com

通讯作者:高彦征 E-mail:gaoyanzheng@njau.edu.cn

多环芳烃(PAHs)是一类在环境中广泛存在的持久性有毒有机污染物,可通过石油开采、污水灌溉及大气沉降等途径进入土壤。多环芳烃具有“三致”效应,在土壤中滞留时间长,严重影响农产品质量、危害人类健康和生态环境安全^[1-2]。如何高效地修复多环芳烃污染土壤已成为国内外土壤与环境领域研究的热点之一。

近年来,丛枝菌根(AM)修复污染土壤技术受到广泛关注。研究发现,地球上 90%的维管束植物都能形成丛枝菌根。丛枝菌根能促进微生物繁殖、改变土壤酶活性、改善土壤理化性质和增强植物抗逆能力^[3-4]。已有文献报道,丛枝菌根在修复有机物污染土壤方面发挥了显著作用^[5-8];但从国内外现有资料来看,丛枝菌根修复有机污染土壤的研究仅涉及较少种类的 AMF 和有机污染物,相关机理有待于深入探讨。

土壤酶是一种生物催化剂,土壤中所进行的生物和生物化学过程都受控于土壤酶的活性。土壤酶活性能直接反映土壤生物化学过程的强度和方向^[9]。丛枝菌根真菌(AMF)可分泌氧化酶等酶类物质,并能影响植物或微生物体内氧化酶等的含量水平,这对增强土壤的抗污染和自修复能力是十分有益的^[10]。目前关于丛枝菌根对 PAHs 污染土壤酶活性的影响还不清楚,有待于试验进一步研究。

菲是燃油和汽车尾气排放 PAHs 的标志物;芘也是一个有代表性的 PAHs,环境中芘的浓度和其他 PAHs 有很好的相关性^[11],这两种污染物常同时存在于污染土壤中。本文以菲和芘为 PAHs 代表物,采用温室盆栽试验方法,研究了菲芘复合污染条件下丛枝菌根对宿主植物三叶草和黑麦草根际土壤多酚氧化酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性的影响,试图了解菲芘共同胁迫下生物活性的变化,为有机污染土壤的丛枝菌根修复提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

菲、芘购自北京化学试剂公司,纯度>98%;二氯甲烷、正己烷、丙酮、无水硫酸钠、层析用硅胶(200~300 目)均为分析纯;甲醇为色谱纯。

供试植物:三叶草(*Trifolium repens* L.)和黑麦草(*Lolium multiflorum* Lam.)。

供试丛枝菌根真菌:摩西球囊霉菌 *Glomus mosseae* (G.m)和幼套球囊霉菌 *Glomus etunicatum* (G.e)购自北京市农林科学院植物营养与资源研究所“中

国丛枝菌根真菌种质资源库(BGC)”。

供试土样:采自南京市江宁,为旱作水稻土表层,其 pH 值为 6.02,有机质含量为 $24.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,砂粒、粉粒和粘粒含量分别为 13.4%、61.9%和 24.7%。土样采集后风干,过 2 mm 筛后,备用。

试验用沙为河沙,水洗后过 2 mm 筛,晾干、备用。

1.2 试验方法

试验设置 6 个处理组,分别为无植物对照、种植三叶草但不接种 AMF、种植三叶草接种 *Glomus mosseae*、种植三叶草接种 *Glomus etunicatum*、种植黑麦草但不接种 AMF 和种植黑麦草接种 *Glomus mosseae*。据文献报道^[12],在一些 PAHs 重污染区,土壤中 PAHs 含量可达上万 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,试验选择污染土壤中菲和芘含量分别为 203.4 和 $107.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与重污染水平相当,是需要修复的。

试验时,配制菲芘的丙酮溶液,同时加入上述土样中。待丙酮完全挥发后,用未污染土壤稀释,多次搅拌,充分混匀,制得菲芘污染土样。将该土样与河沙按 3:1 充分混匀,装盆备用。称取最后制备的土样 270 g 于盆钵中,然后称取菌剂 30 g 均匀覆于上面(无植物对照和无 AMF 处理加入 30 g 灭菌处理的河沙),最后再覆 50 g 土样,加水至 50%田间持水量,静置过夜。供试植物催芽后播于盆钵中,出苗 1 周左右间苗,三叶草每盆留苗 30 株,黑麦草每盆留苗 20 株。定期浇水,土壤水分维持在田间持水量的 50%。各处理均做 3 个重复。分别于植物生长的 20、30、40、50 和 60 d 采样,土样采集后充分混匀,过 10 目筛,放入 4℃冰箱保存,待分析。

1.3 样品提取及测定方法

1.3.1 植物根系浸染率测定

采用曲利本兰染色法^[3]。

1.3.2 微生物数量测定

平板计数法。细菌和真菌分别用牛肉膏蛋白胨和马丁氏培养基培养,30℃条件下分别培养 3 和 4 d 后进行计数^[13]。

1.3.3 土壤多酚氧化酶测定

参照关松荫编著的《土壤酶及其研究法》中测定方法进行测定^[14]。称 1 g 过 1 mm 筛的鲜土样于 50 mL 容量瓶中,加入基质(1% 1,2,3-邻苯三酚)10 mL,摇匀后 30℃下培养 1 h。培养结束后,往瓶中加入 4 mL pH4.5 的柠檬酸-磷酸缓冲液,然后加乙醚至刻度,摇匀使乙醚将生成的没食子素萃取 30 min 后于波长 430 nm 处进行比色测定。多酚氧化酶活性以 1 g 土壤

1 h 内生成的没食子素的 mg 数表示。

1.3.4 土壤酸性磷酸酶测定

采用鲁如坤编著的《农业化学手册》中测定方法进行测定^[15]。称 1 g 新鲜土样(<2 mm)于 50 mL 三角瓶中,加入 0.2 mL 甲苯、4 mL pH6.5 缓冲溶液和 1 mL 对硝基苯磷酸二钠溶液,轻摇混匀并塞上瓶塞,37 °C 下培养 1 h。然后加入 1 mL 的 CaCl₂ 和 4 mL NaOH 溶液,轻摇几秒钟后,滤纸过滤后于波长 410 nm 处进行比色测定。酸性磷酸酶活性以 1 g 土壤 1 h 内生成的对硝基苯酚的 mg 数表示。

1.3.5 土壤过氧化氢酶测定

采用关松荫编著的《土壤酶及其研究法》中测定方法进行测定^[14]。称 5 g 新鲜土壤于 100 mL 三角瓶中,加甲苯 0.5 mL,摇匀,于 0~4 °C 冰箱中放置 0.5 h。取出,立刻加入 25 mL 冰箱贮存的含 3% H₂O₂ 的水溶液。充分摇匀后,再放于 0~4 °C 冰箱中 30 min。取出,迅速加入 1 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 25 mL,摇匀,过滤。取 1 mL 滤液,加 0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 4 mL,用 0.02 mol·L⁻¹ KMnO₄ 滴定,不加土壤的基质作对照测定,并根据对照和试样 0.02 mol·L⁻¹ KMnO₄ 的滴定差,求出相当于分解的 H₂O₂ 的量的 0.02 mol·L⁻¹ KMnO₄ 消耗值。过氧化氢酶活性以 1 g 土壤 1 h 内消耗 0.02 mol·L⁻¹ KMnO₄ mL 数表示。

1.4 数据统计分析

利用 Excel 及 SPSS13.0 统计软件进行试验结果的数据整理,采用 Duncan's 新复极差测验法进行方差分析。

2 结果分析

2.1 植物根系浸染率

供试时间内,植物生长状况良好,没有表现出明显表观毒害效应。菲茈复合污染土壤中接种 AMF 植物根系浸染率如图 1 所示。随生长时间延长,三叶草和黑麦草浸染率均呈增加趋势。接种 *Glomus mosseae* 和 *Glomus etunicatum* 的三叶草浸染率 30 d 前较低,均不超过 10.0%,40 d 时增加到 38.3% 和 33.8%,60 d 时达到 72.9% 和 61.0%。浸染率在不同种类植物间差别较大。接种 *Glomus mosseae* 的黑麦草根系浸染率 20 d 时为 4.0%,60 d 时也仅为 10.5%。Joner 等^[6]研究发现在 3 种 PAHs 污染土壤中种植三叶草和黑麦草,*Glomus mosseae* 对黑麦草根系浸染率显著低于三叶草,与本试验一致。出现这种现象的原因是由于相同条件下同一种 AMF 对不同宿主植物的依赖性存在差

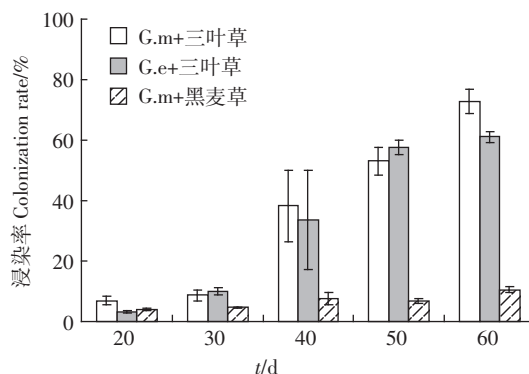


图 1 根系浸染率变化

Figure 1 Root colonization rate of Arbuscular mycorrhizal fungi

异。黑麦草根系发达,自身忍耐土壤有机污染和修复污染土壤能力强,与 AM 亲合能力较差

2.2 土壤多酚氧化酶活性变化

多酚氧化酶是土壤中重要的氧化还原酶,参与催化 PAHs 化合物降解的中间产物儿茶酚转化为苯醌的过程^[8]。土壤多酚氧化酶活性能够反映土壤微生物和修复有机污染物的能力,研究丛枝菌根对多酚氧化酶活性的影响对了解丛枝菌根对有机污染土壤的修复作用和阐明修复机理有重要意义。

由表 1 可知,供试时间内,无论接种 AMF 与否,各处理土壤中多酚氧化酶活性 20~40 d 呈增加趋势,40~60 d 呈降低趋势。有研究表明,在植物生长的前期(前 40 d)土壤中 PAHs 可提取态浓度降解非常快,随后是一个很缓慢的降解过程^[10]。这种变化与多酚氧化酶活性变化一致,可见是植物生长前期迅速降解的 PAHs 提供了大量的碳源和能源,导致土壤微生物和多酚氧化酶活性增加^[1,10]。但随着 PAHs 的不断降解,可利用的碳源和能源减少,微生物数量和多酚氧化酶活性也随之降低。

表 1 表明植物增加了土壤中多酚氧化酶活性。供试时间内,种植三叶草和黑麦草的处理多酚氧化酶活性高于无植物对照。AM 对植物根际多酚氧化酶活性有显著增加作用。宿主植物为三叶草时,接种 *Glomus mosseae* 和 *Glomus etunicatum* 处理酶活性供试时间内均显著高于无植物对照,30~60 d 显著高于不接种处理,分别增加 19.6%~72.0% 和 29.7%~90.7%。供试时间内,接种 *Glomus etunicatum* 的三叶草酶活性总体上高于接种 *Glomus mosseae*,但无显著差异。与三叶草相似,*Glomus mosseae* 对黑麦草根际土壤多酚氧化酶活性也有显著增加作用。接种 *Glomus mosseae* 的黑麦草根际酶活性供试时间内均高于无植物对照和

不接种处理,40~60 d 差异均达显著水平。试验发现,相比于不接种处理,供试时间内接种 *Glomus mosseae* 对三叶草根际多酚氧化酶活性平均增加 40.6%,而 *Glomus mosseae* 对黑麦草的这一数值为 27.3%。接种 *Glomus mosseae* 对三叶草根际酶活性增加作用大于黑麦草,这与 *Glomus mosseae* 对三叶草根系浸染率较高和三叶草对 AM 依赖作用较大有关。

试验比较了土壤中细菌和真菌数量发现,相比于不接种处理,接种 *Glomus mosseae* 和 *Glomus etunicatum* 的三叶草 20 d 时根际土壤中细菌数量增加了 141.9% 和 35.4%,真菌数量增加了 82.1% 和 48.4%。AMF 与植物根系形成共生体系,可改善根际环境,促进土壤微生物生长和繁殖^[10,16]。两种 AMF 处理的三叶草多酚氧化酶活性 20 d 时比不接种处理分别增加了 34.6% 和 74.3%,与微生物数量变化一致。刘世亮等^[5]曾研究了土壤中可提取 B[a]P 浓度和多酚氧化酶的关系表明,接种 AMF 提高了土壤多酚氧化酶活性,从而对 B[a]P 的降解起到强化作用。可以推测,接种 AMF 可以增加土壤中微生物数量,进而增加土壤多酚氧化酶活性,促进多环芳烃在土壤中降解。

2.3 土壤酸性磷酸酶活性变化

土壤中存在 3 类磷酸酶:碱性、中性和酸性磷酸酶^[17]。由于供试土样为酸性土壤,故本试验仅测定酸性磷酸酶的变化规律。如表 2 所示,菲芘复合污染土壤中植物对酸性磷酸酶活性有显著增加作用。供试时间内,三叶草和黑麦草根际土壤中酸性磷酸酶活性均高于无植物对照,三叶草根际土壤酶活性 20 d 时达显著水平,黑麦草根际土壤酶活性除 20~30 d 外均达显著水平。

AM 对三叶草和黑麦草根际酸性磷酸酶活性影响不同。宿主植物为三叶草时,接种 *Glomus mosseae* 处理酶活性与不接种相比无明显变化趋势;而接种 *Glomus etunicatum* 酶活性总体上高于不接种,但无显著差异。接种 *Glomus etunicatum* 的三叶草根际酶活性 20 d 时显著高于接种 *Glomus mosseae*,之后无显著差异。宿主植物为黑麦草时,接种 *Glomus mosseae* 处理酶活性 20 d 时显著高于不接种,之后无显著差异,60 d 时显著低于不接种。

以往研究证明,AM 根外菌丝可以分泌酸性磷酸酶,增加植物磷吸收^[3]。本试验中,AM 对植物根系酸性磷酸酶活性并未有显著增加作用,可能原因是 AM

表 1 菲芘污染土壤中多酚氧化酶的变化

Table 1 Polyphenol oxidase in contaminated soils by phenanthrene and pyrene

植物 Plants	处理 Treatments	时间/d				
		20	30	40	50	60
无植物 No plant	无 AMF No AMF	0.141 ^c (0.022)	0.316 ^{cd} (0.039)	0.510 ^c (0.045)	0.379 ^c (0.041)	0.297 ^d (0.045)
三叶草 <i>Trifolium repens</i> L.	无 AMF No AMF	0.269 ^{bc} (0.046)	0.257 ^d (0.027)	0.581 ^c (0.024)	0.389 ^c (0.017)	0.437 ^c (0.019)
	G.m	0.362 ^{ab} (0.033)	0.441 ^{ab} (0.001)	0.825 ^{ab} (0.030)	0.523 ^b (0.016)	0.523 ^b (0.034)
	G.e	0.469 ^a (0.073)	0.489 ^a (0.031)	0.901 ^{ab} (0.029)	0.504 ^b (0.028)	0.576 ^{ab} (0.018)
黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i> Lam	无 AMF No AMF	0.228 ^{bc} (0.030)	0.342 ^{bcd} (0.014)	0.782 ^b (0.080)	0.506 ^b (0.046)	0.549 ^b (0.021)
	G.m	0.294 ^b (0.004)	0.403 ^{abc} (0.050)	1.008 ^a (0.117)	0.724 ^a (0.033)	0.649 ^a (0.018)

注:括号内数字为标准差,字母相同差别不显著,字母不同则差别显著($\alpha=0.05$),下同。Note: Data in bracket were standard deviations; $n=3$. Same letter denotes non-significant difference while different letters denote a significant difference($\alpha=0.05$), the same below.

表 2 菲芘污染土壤中酸性磷酸酶的变化

Table 2 Acid phosphatase in contaminated soils by phenanthrene and pyrene

植物 Plants	处理 Treatments	时间/d				
		20	30	40	50	60
无植物 No plant	无 AMF No AMF	31.0 ^d (1.12)	38.2 ^c (1.82)	41.6 ^c (0.71)	34.3 ^b (0.10)	40.8 ^d (1.53)
	无 AMF No AMF	36.2 ^{bc} (0.78)	41.1 ^a (0.75)	46.8 ^a (0.77)	42.8 ^b (1.50)	46.3 ^{cd} (1.86)
三叶草 <i>Trifolium repens</i> L.	G.m	33.2 ^{cd} (0.67)	38.9 ^a (2.44)	49.6 ^a (6.69)	40.0 ^b (1.59)	52.3 ^{bc} (1.38)
	G.e	37.5 ^b (1.10)	39.3 ^a (2.57)	49.5 ^a (1.43)	44.8 ^b (1.85)	48.9 ^c (2.26)
	无 AMF No AMF	37.3 ^b (1.69)	40.3 ^a (0.23)	53.2 ^a (0.61)	66.4 ^a (6.99)	69.2 ^a (4.30)
黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i> Lam	G.m	41.2 ^a (0.83)	40.2 ^a (1.64)	52.4 ^a (3.47)	68.1 ^a (11.46)	59.0 ^b (0.74)

菌丝扩大了根系吸收范围,增强了磷素吸收,减轻植物缺磷胁迫,因为缺磷胁迫可增加土壤磷酸酶活性^[4]。比较了各处理的生物量(鲜重)发现,除 20 d 外,接种 AMF 的三叶草和黑麦草根和茎叶生物量均明显大于未接种处理。可以认为,菲芘复合污染条件下,丛枝菌根通过菌丝吸收根系不能到达的土壤中的磷促进植物了生长。

2.4 土壤过氧化氢酶活性变化

土壤过氧化氢酶活性变化如表 3 所示。菲芘复合污染土壤中植物对过氧化氢酶活性有增加作用。供试时间内,三叶草和黑麦草根际土壤中过氧化氢酶活性高于无植物对照。

供试时间内,AM 增加了三叶草根际过氧化氢酶活性,总体上降低了黑麦草根际过氧化氢酶活性。宿主植物为三叶草时,两种 AMF 处理土壤过氧化氢酶活性比不接种分别增加 3.3%~12.2%和 7.8%~34.7%,接种 *Glomus mosseae* 处理酶活性 60 d 时达显著水平,接种 *Glomus etunicatum* 处理酶活性除 50 d 外均达显著水平。接种 *Glomus etunicatum* 的三叶草酶活性供试时间内均高于接种 *Glomus mosseae*, 20~30 d 达显著水平。接种 *Glomus mosseae* 的黑麦草根际过氧化氢酶活性总体上呈降低趋势,但差异不显著。AM 作用的性质和宿主植物的种类有关^[18]。此外,这种现象与 AM 直接或间接影响根际微生物,有选择抑制或促进根际微生物有一定关系。

过氧化氢酶是土壤中重要的氧化酶,能够促进过氧化氢对各种化合物的氧化,其活性常作为一项污染土壤的生态毒理学指标^[19-20]。目前关于污染土壤过氧化氢酶活性变化的研究大多是在无植物的环境中进行。本试验观察到三叶草接种丛枝菌根后土壤过氧化氢酶活性有增加现象,这是否是丛枝菌根促进土壤中菲芘降解的作用机理之一,还有待于研究进一步证明。

通过比较 *Glomus mosseae* 对 3 种酶活性的影响可以看出:多酚氧化酶和过氧化氢酶相比,多酚氧化酶对 AM 更为敏感,其中 *Glomus mosseae* 对三叶草和黑麦草根际多酚氧化酶活性平均增幅为 40.6%和 27.3%,可以预测多酚氧化酶促进 PAHs 降解能力较强;*Glomus mosseae* 对三叶草根际过氧化氢酶活性平均增加 7.4%,但接种后黑麦草根际酶活性总体上有降低趋势,表明 AM 作用的性质随宿主植物不同而有差异;AM 对三叶草和黑麦草根际的酸性磷酸酶活性影响有限,因为酸性磷酸酶活性还受到磷素供应状况影响。

3 结论

(1)菲芘复合污染土壤中,植物增加了土壤多酚氧化酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性。供试时间内,接种 *Glomus mosseae* 和 *Glomus etunicatum* 均增加了三叶草根际土壤多酚氧化酶、过氧化氢酶活性,酸性磷酸酶活性总体呈增加趋势。接种 *Glomus mosseae* 增加了黑麦草根际多酚氧化酶活性,但总体上降低了过氧化氢酶活性,酸性磷酸酶的活性先升高后降低。

(2)接种 *Glomus etunicatum* 的三叶草根际酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性 30 d 前显著高于 *Glomus mosseae*,之后差异不明显。相同 AM 真菌对不同种类宿主植物影响不同,AM 真菌作用的性质与植物特性有关。

参考文献:

- [1] Joner E J, Leyval C. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37: 2371-2375.
- [2] Ling W T, Gao Y Z. Promoted dissipation of phenanthrene and pyrene in soils by amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) [J]. *Environ Geol*, 2004, 46: 553-560.
- [3] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

表 3 菲芘污染土壤中过氧化氢酶的变化

Table 3 Catalase in contaminated soils by phenanthrene and pyrene

植物 Plant	处理 Treatments	时间/d				
		20	30	40	50	60
无植物 No plant	无 AMF No AMF	0.116 ^c (0.007)	0.155 ^b (0.009)	0.345 ^b (0.009)	0.243 ^a (0.009)	0.361 ^b (0.012)
三叶草 <i>Trifolium repens</i> L.	无 AMF No AMF	0.134 ^{bc} (.003)	0.164 ^b (0.018)	0.343 ^{bc} (0.006)	0.305 ^a (0.027)	0.375 ^b (0.012)
	G.m	0.139 ^b (0.010)	0.183 ^b (0.009)	0.360 ^{ab} (0.003)	0.318 ^a (0.009)	0.409 ^a (0.006)
	G.e	0.165 ^a (0.003)	0.218 ^a (0.012)	0.370 ^a (0.007)	0.344 ^a (0.010)	0.409 ^a (0.003)
黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i> Lam	无 AMF No AMF	0.151 ^{ab} (0.006)	0.174 ^b (0.003)	0.324 ^c (0.003)	0.324 ^a (0.015)	0.375 ^b (0.019)
	G.m	0.153 ^{ab} (0.007)	0.159 ^b (0.003)	0.343 ^{bc} (0.009)	0.317 ^a (0.003)	0.351 ^b (0.010)

- LIU Run-jin, LI Xiao-lin. Arbuscular mycorrhizal fungi and the application[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [4] 王曙光, 林先贵, 尹 睿, 等. 接种 AM 真菌对 PAEs 污染土壤中微生物和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2004, 23(1): 48-51.
- WANG Shu-guang, LIN Xian-gui, YIN Rui, et al. Effect of inoculation with fungi on microorganism and enzyme activity in PAEs-polluted soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 48-51.
- [5] 刘世亮, 骆永明, 丁克强, 等. 苯并[a]芘污染土壤的丛枝菌根强化植物修复作用研究[J]. 土壤学报, 2005, 41(3): 336-342.
- LIU Shi-liang, LUO Yong-ming, DING Ke-qiang, et al. Enhanced phytoremediation of benzo[a]pyrene contaminated soil with arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 41(3): 336-342.
- [6] Joner E J, Johansen A, Loibner A P, et al. Rhizosphere effects on microbial community structure and dissipation and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in spiked soil[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 2773-2777.
- [7] Wu N Y, Zhang S Z, Huang H L, et al. DDT uptake by arbuscular mycorrhizal alfalfa and depletion in soil as influenced by soil application of a non-ionic surfactant[J]. *Environ Pollut*, 2008, 151: 569-575.
- [8] 刘世亮, 骆永明, 丁克强, 等. 黑麦草对苯并[a]芘污染土壤的根际修复及其酶学机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 526-532.
- LIU Shi-liang, LUO Yong-ming, DING Ke-qiang, et al. Rhizosphere remediation and its mechanism of benzo[a]pyrene-contaminated soil by growing ryegrass[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 526-532.
- [9] 邱莉萍, 张兴昌. Cu Zn Cd 和 EDTA 对土壤酶活性影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 30-33.
- QIU Li-ping, ZHANG Xing-chang. Effects of Cu, Zn, Cd and EDTA on soil enzyme activities [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 30-33.
- [10] 李秋玲, 凌婉婷, 高彦征, 等. 丛枝菌根对有机污染土壤修复作用及机理[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2217-2221.
- LI Qiu-ling, LING Wan-ting, GAO Yan-zheng, et al. Arbuscular mycorrhizal bioremediation and its mechanisms of organic pollutants-contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2217-2221.
- [11] 高彦征, 朱利中, 胡晨剑, 等. Tween80 对植物吸收菲和芘的影响[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 713-718.
- GAO Yan-zheng, ZHU Li-zhong, HU Chen-jian, et al. Effects of Tween 80 on plant uptake of phenanthrene and pyrene from water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(4): 713-718.
- [12] 宋玉芳, 常士俊, 李 利, 等. 污灌土壤中多环芳烃(PAHs)积累与动态变化研究[J]. 应用生态学报, 1997(8): 93-98.
- SONG Yu-fang, CHANG Shi-jun, LI Li, et al. Accumulation and dynamic change of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wastewater irrigated soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997(8): 93-98.
- [13] 赵 斌, 何绍江. 微生物学试验[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- ZHAO Bin, HE Shao-jiang. Microbiology experiment[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and research method [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [15] 鲁如坤. 农业化学手册[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- LU Ru-kun. Agriculture chemistry manual[M]. Beijing: Agriculture Press, 1982.
- [16] 李秋玲, 凌婉婷, 高彦征, 等. 丛枝菌根对土壤中多环芳烃降解的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1705-1710.
- LI Qiu-ling, LING Wan-ting, GAO Yan-zheng, et al. Effects of arbuscular mycorrhizae on degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1705-1710.
- [17] 和文祥, 姚敏杰, 孙丽娜, 等. 呋喃丹对土壤酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1921-1924.
- HE Wen-xiang, YAO Min-jie, SUN Li-na, et al. Effects of furadan on soil enzyme activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1921-1924.
- [18] 戴 梅, 王洪娟, 殷元元, 等. 丛枝菌根真菌与根围促生细菌相互作用的效应与机制[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2854-2858.
- DAI Mei, WANG Hong-xian, YIN Yuan-yuan, et al. Effects and mechanisms of interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2854-2858.
- [19] 宫 璇, 李培军, 张海荣, 等. 菲对土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 981-984.
- GONG Xuan, LI Pei-jun, ZHANG Hai-rong, et al. Effects of phenanthrene contamination of enzyme activity in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 981-984.
- [20] 徐 珍, 郭正元, 黄 帆, 等. 霸螨灵、克螨特及其混剂对土壤过氧化氢酶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1654-1658.
- XU Zhen, GUO Zheng-yuan, HUANG Fan, et al. Effects of fenpyroximate and propargite as well as its mixture on catalase in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6): 1654-1658.